

철도교용 프리캐스트 바닥판의
적정한 종방향 프리스트레스 수준의 산정
**Evaluation of Proper Level of the Longitudinal Prestress
for the Precast Deck System of Railway Bridges**

장성욱* 윤석구** 전세진*** 김영진**** 형태경*****
Jang, Sung-Wook Youn, Seok-Goo Jeon, Se-Jin Kim, Young-Jin Hyung, Tai-Kyung

ABSTRACT

Precast concrete deck has many advantages comparing with the in-situ concrete deck, and has been successfully applied to replacement of the deteriorated decks and to the newly constructed highway bridges in domestic region. In order to apply the precast decks into the railway bridges, however, differences of the load characteristics between the highway and the railway should be properly taken into account including the train load, longitudinal force of the continuous welded rail, acceleration or braking force, temperature change and shrinkage. Proper level of the longitudinal prestress of the tendons that can ensure integrity of the transverse joints in the deck system is of a primary importance. To this aim, the longitudinal tensile stresses induced by the design loads are derived using three-dimensional finite element analyses, design codes and theoretical equations for the frequently adopted PSC composite girder railway bridge. The estimated proper prestress level to counteract those tensile stresses is over 2.4 MPa, which is similar to the case of the highway bridges.

1. 서 론

프리캐스트 콘크리트 바닥판(그림 1)은 현장타설되는 일반적인 철근콘크리트 바닥판과 비교할 때 급속 시공, 거푸집이나 동바리공의 생략, 공장제작을 통한 품질관리 용이 및 고강도 확보 등 많은 장점을 가지고 있어 국외의 교량에 활발히 적용되어 왔다. 바닥판의 수화열 및 상당 부분의 건조수축이 바닥판과 거더의 합성 이전에 발생하므로 외부구속이 원인이 되어 발생하는 바닥판의 횡방향 균열을 효과적으로 저감할 수도 있다. 최근 국내에서도 프리캐스트 바닥판에 대한 연구가 활발히 진행되어 도로교에 대해서는 노후 바닥판 교체 공사 및 신설 교량 설계에 성공적으로 적용되어 왔다¹⁾. 이를 바탕으로 최근 활발히 발주되고 있는 철도교에 대해서도 확장하여 적용하고자 하는 연구가 진행중이다. 그러나, 철도교는 도로교와 비교할 때 활하중 및 기타 하중에서 차이가 크므로 이러한 하중 특성의 차이를 적절히 반영한 설계가 요망된다. 특히 바닥판 간 횡방향 이음

* 책임저자 : 서울산업대학교 철도전문대학원 석사과정, 정회원
** 서울산업대학교 토목공학과 교수
*** 대우건설기술연구소 토목연구팀 선임연구원
**** 대우건설기술연구소 토목연구팀 수석연구원
***** 대우건설 토목기술2팀 부장

부의 연속성을 확보하여 일체화시키는 문제는 설계하중에 대해 올바른 구조거동을 유도하기 위해 핵심적으로 검토되어야 할 사항이다. 이를 위해 본 연구에서는 바닥판 내부에 배치한 종방향 텐던을 통하여 프리스트레스를 가하는 방법을 도입했는데, 도로교에 적용시 적절한 종방향 프리스트레스 수준에 대해서는 어느정도 검토된 바 있지만^{2,3)} 철도교에 대해서는 아직까지 신뢰할만한 연구 결과가 없는 실정이다.

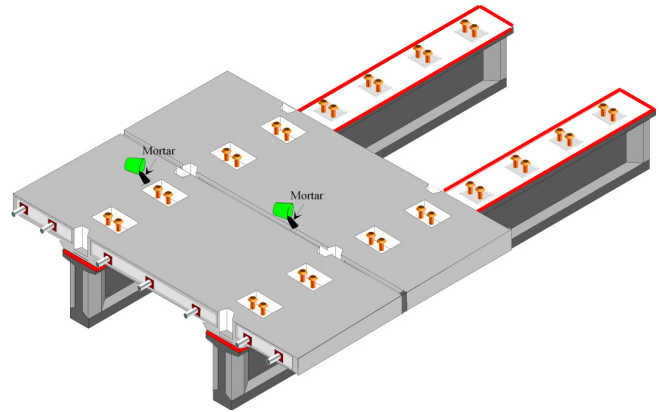


그림 1. PSC 거더와 프리캐스트 콘크리트 바닥판

따라서, 본 연구에서는 종방향 텐던을 갖는 프리캐스트 바닥판 시스템을 철도교에 적용할 때 바닥판 간 이음부에서 발생하는 벌어짐 또는 균열을 방지할 수 있는 적절한 프리스트레스 수준에 대하여 고찰해 보았으며, PSC 합성거더교를 해석 대상으로 삼았다(그림 1). 주로 정밀한 3차원 유한요소해석을 통해 주요 설계하중이 유발하는 바닥판의 종방향 인장응력을 산정하였으며, 이를 상쇄할 수 있는 프리스트레스의 범위를 결정하였다. 그 중, 바닥판과 거더의 온도차나 건조수축차가 유발하는 응력은 설계기준의 제안식이나 이론적으로 유도된 식으로도 고찰하여 유한요소해석 결과와 비교해 보았다.

주로 정밀한 3차원 유한요소해석을 통해 주요 설계하중이 유발하는 바닥판의 종방향 인장응력을 산정하였으며, 이를 상쇄할 수 있는 프리스트레스의 범위를 결정하였다. 그 중, 바닥판과 거더의 온도차나 건조수축차가 유발하는 응력은 설계기준의 제안식이나 이론적으로 유도된 식으로도 고찰하여 유한요소해석 결과와 비교해 보았다.

2. 대상 교량의 주요제원 및 유한요소모델

해석 대상은 LS-22의 표준화하중에 대해 설계된 1급선(설계속도: 200 km/h)의 복선 철도교이며, 25 m 단경간을 5개 거더(거더 간격: 2.0 m, 거더 높이: 2.35 m)가 지지하고 있다. 합성거더 도로교에서는 거더의 갯수나 간격, 높이 등이 매우 다양하므로 일반성을 확보하기 위해서는 이러한 요소들에 대한 매개변수 연구가 바람직하나, 일반적인 PSC 합성거더 철도교의 경우에는 전형적인 형상에 따르는 경우가 많으므로 따로 매개변수 연구를 수행하지는 않았다.

프리캐스트 바닥판의 강도는 통상의 현장타설 콘크리트 바닥판의 27 MPa보다 증가된 35 MPa이며, 이러한 강도 증가분을 활용하여 바닥판 두께도 통상의 현타 바닥판의 280 mm보다 더욱 감소시켜 프리스트레스트 콘크리트 바닥판의 최소두께인 200 mm로 설계하였다. 프리캐스트 바닥판 1개 세그먼트의 종방향 길이는 이음부를 포함하여 2.0 m이다. 그림 1을 참조하여 시공 순서를 간략히 설명하면, 먼저 프리캐스트 바닥판들을 현장에 미리 설치된 거더들 위에 거치한 후 바닥판 간 이음부를 무수축 모르타르로 채운다. 모르타르 강도가 일정 수준에 도달하면 종방향 프리스트레싱 작업을 수행한다. 마지막으로 전단 포켓에 무수축 모르타르를 타설하면 바닥판과 거더가 스티드를 통하여 합성되게 된다¹⁾.

바닥판에 도입되어야 할 적절한 종방향 프리스트레스 수준을 평가하기 위해서는 먼저 설계하중에 의해 바닥판에 발생하는 종방향 응력을 산정해야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 그림 2와 같이 정밀한 3차원 유한요소모델을 구성하였다. 바닥판, 거더 및 가로보는 8절점 솔리드 요소를 사용하여 모델링하였으며, 바닥판에서 거더와 합성되는 위치인 전단 포켓에 설치되는 스티드는 보 요소로 모델링하였다. 해석에는 범용구조해석 프로그램 LUSAS⁴⁾를 사용하였다.

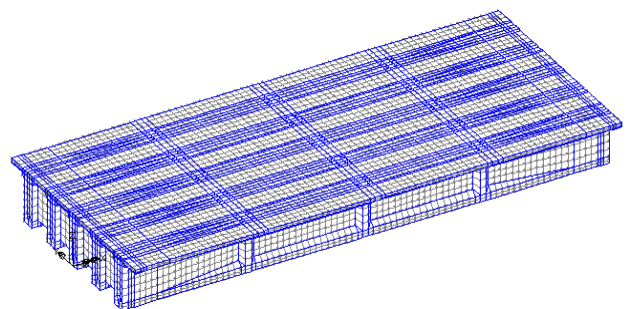


그림 2. 해석대상 교량의 유한요소모델

3. 바닥판의 종방향 응력 산정

3.1 활하중

3.1.1 개요

도로교의 경우 국내 설계기준에는 활하중에 대한 바닥판의 주요 설계 방향인 횡방향의 설계모멘트 값이 주어져 있으며⁵⁾, 일본 도로교시방서와 같이 횡방향 이외에 종방향의 설계모멘트 값까지 제시된 경우도 있다⁶⁾. 하지만, 철도교의 경우에는 본 연구에서 요구되는 활하중에 의한 바닥판 종방향 응력이나 모멘트값이 설계기준에 주어지지 않으므로 정밀해석 또는 실험에 의존할 수밖에 없는 실정이다. 정철현 등³⁾은 도로교에 대해 유한요소해석 및 실험을 통해 활하중에 의한 바닥판 종방향 응력을 산정한 바 있으며, 또 다른 방법론으로 윤석구 등²⁾과 같이 일본 도로교시방서의 횡방향 설계모멘트에 대한 종방향 설계모멘트의 비를 국내 도로교설계기준의 횡방향 설계모멘트에 곱하여 종방향 설계모멘트를 산정한 예도 있다. 하지만, 후자의 경우 도로교와 철도교의 활하중 차이로 인해 철도교에 직접 적용하기는 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 기본적으로 정밀 유한요소해석 결과를 기초로 하되, 비록 적용성에 의문이 있지만 비교를 위해 철도설계기준⁷⁾에 의해 산정한 횡방향 설계모멘트에 일본 도로교시방서에 제시된 모멘트비를 적용하여 종방향 설계모멘트를 구하고 이를 응력으로 치환하는 방법론과도 결과값을 비교해 보았다.

3.1.2 유한요소해석 결과

사전해석 결과에 의해 바닥판에 더 큰 종방향 인장응력을 유발하도록 L-22 하중을 단선으로 재하하였으며 축하중들의 위치는 영향선 분석을 통하여 도출하였다. 콘크리트교에 대한 충격계수는 해석시 함께 고려하였다. 최대 종방향 인장응력은 교량 단부의 거더 사이에서 발생한 0.235 MPa로서 이는 도로교 활하중이 유발하는 종방향 인장응력³⁾의 최대값 발생 위치와 유사하지만 값은 훨씬 작다. 도로교의 DB-24 하중의 최대 윤하중이 96 kN이고 철도교의 L-22 하중의 최대 윤하중이 110 kN으로 L-22 하중이 좀 더 크다. 하지만, 본 철도교의 거더 간격은 2 m로서 통상의 도로교보다 작고, 또한 자갈도상에 의한 하중 분포효과를 고려하였으므로 도로교에서 가장 하중 재하 효과가 큰 거더 사이 바닥판 중앙부에 윤하중을 작용시키는 것과 비교할 때 하중 재하 효과가 감소한 것으로 판단된다.

3.1.3 설계기준에 의한 계산 결과

철도설계기준에는 주거더에 지지된 바닥판에서 열차 축중을 자갈도상을 고려한 분포 면적으로 나누어 환산등분포하중으로 치환한 후 이를 이용하여 횡방향 설계휨모멘트를 구하는 절차가 제시되어 있다. 본 궤도구조에서 하중 분포폭은 교축방향으로 0.920 m, 교축직각방향으로 3.080 m로 계산되며, 최대 환산등분포하중을 구해보면 77.640 kN/m²이다. 이를 충격을 고려하여 설계휨모멘트 계산식에 대입하면 단위폭당 36.457 kN·m의 횡방향 모멘트가 산출된다. 일본 도로교시방서를 준용할 때 거더 간격 2.0 m에 대해 횡방향 모멘트에 대한 종방향 모멘트의 비는 0.774로서, 따라서 종방향 활하중 모멘트는 단위폭당 28.218 kN·m이고 이는 최대 4.233 MPa의 응력을 유발한다. 이를 유한요소해석 결과와 비교할 때 값이 매우 과도한 편이다. 물론 철도교에는 도로교와 같은 충격계수 상한선이 없으므로 큰 충격계수가 고려되었고 또한 설계모멘트 계산식 자체가 매우 보수적으로 되어 있는 이유도 크지만, 또 한가지 이유는 정철현 등³⁾이 지적한 바와 같이 정밀해석 및 실험 결과와 비교할 때 일본 도로교시방서는 종방향 모멘트 및 응력의 크기를 과대평가하고 있기 때문이다. 따라서, 철도교의 경우에도 활하중이 유발하는 종방향 응력은 유한요소해석 등 정밀한 방법론에 의존하는 것이 바람직하다고 판단된다.

3.2 장대레일 종하중 및 시제동하중

철도설계기준을 참조하여 한 레도당 10 kN/m의 장대레일 종하중을 레일면 높이에 가하였다. 제동하중은 LS 하중의 15%를, 시동하중의 경우 동륜하중의 25%를 레일면상 2.0 m 높이에 가하였다. 이러한 하중들은 바닥판을 벗어나서 작용하므로 가상 부재를 통해 편심효과를 고려하였다.

3.3 온도변화

3.3.1 유한요소해석 결과

철도설계기준을 참조하여 바닥판과 거더의 온도차는 $\pm 5^\circ\text{C}$ 로 보았다. 콘크리트의 선팅창계수는 콘크리트교에 대한 대한 설계값인 $10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 로 두었다. 유한요소해석 결과 바닥판의 종방향 인장응력은 바닥판 온도 하강시가 상승시보다 더 컸으며, 이는 바닥판의 온도가 떨어질 때 바닥판이 종방향으로 수축하려는 거동을 거더가 외적으로 구속하여 인장응력이 크게 유발되기 때문이다.

3.3.2 설계기준 및 이론적인 엄밀해에 의한 결과

철도설계기준에서 바닥판과 거더에 온도차가 발생했을 때의 종방향 응력은 바닥판과 거더 각각에 발생하는 축력 및 모멘트를 식 (1) 및 (2)에서 구하여 두가지 단면력에 의한 합성응력을 산정한다. 식 (2)에서 바닥판과 거더에 발생하는 모멘트는 각각의 강성비를 가지고 총모멘트를 분배하여 구한다. 여기에서, 첨자 c 는 바닥판, 첨자 s 는 거더를 나타내며 n 은 탄성계수비, d 는 바닥판 중립축과 거더 중립축 사이의 거리, α 는 선팅창계수, $\pm t$ 는 바닥판과 거더의 온도차이다.

$$N_c = N_s = \frac{\alpha(\pm t)E_s}{\frac{n}{A_c} + \frac{1}{A_s} + \frac{nd^2}{I_c + nI_s}} \quad (1)$$

$$M_c = \frac{I_c}{I_c + nI_s} N_c d \quad M_s = \frac{nI_s}{I_c + nI_s} N_c d \quad (2)$$

본 합성거더의 플랜지 유효폭은 거더 중심간 거리인 2 m이므로 내측거더의 경간 중양을 기준으로 $A = 1.2893\text{m}^2$, $I = 1.1150\text{m}^4$ 이다. 바닥판 온도가 5°C 하강했을 경우 바닥판 상연응력은 0.499 MPa, 하연응력은 0.587 MPa로 계산된다. 한편, 보 이론에 근거한 이론적인 엄밀해는 온도에 의해 유발되는 단면 곡률 및 축방향 변형률을 각각 식 (3)과 (4)에서 구한 후, 실제 발생하는 응력은 온도에 의한 신축의 영향을 제외하여 식 (5)와 같이 산정할 수 있다.

$$\psi = \frac{M}{E_s I} = \frac{1}{E_s I} \int \sigma y dA = \frac{1}{E_s I} \int [E_s \alpha(\pm t)] y b dy = \frac{\alpha}{I} \int [\pm t(y)] y b(y) dy \quad (3)$$

$$\epsilon_0 = \frac{P}{E_s A} = \frac{1}{E_s A} \int \sigma dA = \frac{1}{E_s A} \int [E_s \alpha(\pm t)] b dy = \frac{\alpha}{A} \int [\pm t(y)] b(y) dy \quad (4)$$

$$f_c = E_c \{(\epsilon_0 + \psi y) - \alpha [\pm t(y)]\} \quad (5)$$

윗 식을 통해 바닥판 응력을 계산해 본 결과 설계기준에 의한 결과와 정확히 일치함을 파악할 수 있었다. 즉, 설계기준에 의한 식은 근사식이 아니며 보 이론에 근거한 엄밀한 계산식을 그대로 재현할 수 있음을 본 비교고찰에서 밝혔다. 그림 3은 바닥판 온도가 5°C 강하시 유한요소해석, 설계기준 및 이론식에 의한 바닥판의 높이별 응력 분포를 보여주고 있다. 공정한 비교를 위해 위치는 내측거더의 경간 중양에 위치한 바닥판으로 설정하였다. 전체적으로 경향은 비슷하지만 설계기

준보다는 유한요소해석에 의한 결과가 응력을 좀 더 크게 평가하고 있으므로 주의가 필요하다. 이러한 경향은 정철현 등³⁾에서도 지적되었던 바 있다.

3.4 건조수축

설계기준에서 바닥판의 건조수축 현상을 다루는 방법론은 바닥판과 거더의 온도차 고려시와 거의 유사하다. 합성 이후 바닥판의 건조수축 현상을 거더가 구속할 경우 바닥판 인장응력이 유발되나, 보통 합성 이전에 1~2달 정도 소요됨을 고려하여 철도설계기준의 최종건조수축률인 20×10^{-5} 의 약 50% 정도만 발생하는 것으로 가정하였다.

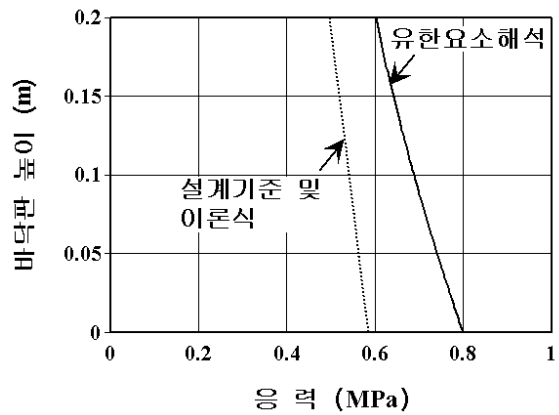


그림 3. 온도차에 의한 바닥판의 종방향 응력

3.5 조합하중

각 하중조합의 의미는 표 1과 같으며, 표 2에서는 각 개별하중 및 하중조합이 발생시키는 최대 인장응력 및 압축응력을 정리하였다. 개별하중들 중에서 지배적인 인장응력을 유발시키는 것은 바닥판의 온도 저하 및 시동하중이었으며, 나머지 개별하중이 유발하는 인장응력의 크기는 비교적 작은 편이었다. 특히, 도로교의 경우 활하중에 의한 종방향 인장응력이 지배적이었던 데 반해²⁾, 본 철도교의 경우에는 활하중 효과가 작은 것이 특징이다. 가장 지배적인 하중조합은 온도 저하와 시동하중이 동시에 포함되는 하중조합 4로 나타났다.

4. 적절한 종방향 프리스트레스의 도출

도로교의 경우 국내 설계기준에는 프리캐스트 바닥판에 도입되어야 할 최소 프리스트레스가 명확히 규정되어 있지 않다. 하지만 미국 AASHTO⁸⁾에는 1.7 MPa, 일본 도로교시방서⁶⁾에는 2.9 MPa 이상의 유효 프리스트레스를 도입하도록 규정하고 있다. 윤석구 등²⁾은 활하중에 의한 종방향 모멘트 및 바닥판 간 이음부의 부착강도를 고려할 때 거더의 간격에 따라 요구되는 프리스트레스가 변화함을 보였다. 즉, 모르타 부착강도를 1.1 MPa로 볼 때 거더 간격 2.0 m일 때 1.5 MPa, 2.5 m일 때 2.0 MPa, 3.0 m 이상일 때 2.5 MPa 정도의 프리스트레스가 요구된다고 하였다.

전술하였듯 철도교는 도로교와 설계하중이 상이하므로 이러한 기존의 연구를 그대로 철도교에 적용하는 것은 의문시되며, 따라서 앞서 실시한 철도교 설계하중에 대한 정밀 해석을 기반으로 최적의 종방향 프리스트레스 수준을 제안해 보았다. 일단, 바닥판 간 이음부의 무수축 모르타의 부착강도는 변동성이 매우 크므로 추가의 안전성을 부여하는 요인으로 두고 무시했다. 종방향 프리스트레스를 통해 바닥판들이 벌어지는 것을 방지해야 하므로 최소 종방향 프리스트레스는 표 2의 최대 인장응력을 상쇄할 수 있는 수준이 요구된다. 또한 최대 종방향 프리스트레스는 콘크리트의 허용압축응력 이내여야 한다. 따라서, 철도교용 프리캐스트 바닥판의 올바른 구조거동을 유도할 수 있는 적절한 프리스트레스의 범위는 약 2.4~9.7 MPa(압축)의 범위로 파악되었다. 물론 경제적인 설계를 위해서는 하한치에 약간의 여유를 둔 정도가 적절하다. 이는 AASHTO에서 규정하고

표 1. 하중조합

구분	하중조합
1	고정하중+ 활하중(충격 포함)+ 장대레일 종하중+ 건조수축
2	고정하중+ 활하중(충격 포함)+ 장대레일 종하중+ 온도변화+ 건조수축
3	고정하중+ 활하중(충격 포함)+ 장대레일 종하중+ 시동하중(또는 제동하중)+ 건조수축
4	고정하중+ 활하중(충격 포함)+ 장대레일 종하중+ 온도변화+ 시동하중(또는 제동하중)+ 건조수축

있는 1.7 MPa보다는 크지만, 국내 도로교용 프리캐스트 바닥판에 통상 적용하고 있는 2.5 MPa과는 큰 차이가 없는 정도이다. 즉, 프리캐스트 바닥판을 철도교에 적용함에 있어 과도한 종방향 프리스트레스의 도입이 요망되어 밀집된 텐던 배치로 시공성이 저하되는 일이 발생하지는 않을 것임을 시사하고 있으며, 도로교 적용시와 유사한 수준의 프리스트레스 도입을 통해서도 구조 건전성을 확보할 수 있음을 의미한다.

5. 결 론

본 연구에서는 국내에서 도로교용으로 성공적으로 적용된 프리캐스트 콘크리트 바닥판을 철도교에도 확장하여 적용하기 위한 요소 기술 연구의 일환으로 PSC 합성 거더 철도교 적용시 바닥판에 도입되어야 할 프리스트레스를 평가하였다. 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

1. LS-22 활하중에 의한 바닥판 종방향 응력은 설계기준의 결과가 유한요소해석에 의한 결과보다 매우 과대평가된 값을 산출하므로 엄밀한 유한요소해석에 의존하는 것이 바람직하다. 도로교와 철도교를 비교할 때 거더 간격이나 하중 고려 방식의 차이로 인해 활하중에 의한 종방향 응력은 철도교에서 매우 작은 편이다.
2. 바닥판의 온도 변화에 의해 유발되는 종방향 응력 산정식은 철도설계기준 및 보 이론에 근거한 엄밀식이 동일한 결과를 산출함을 보였다. 온도 변화에 대한 유한요소해석 결과는 설계기준 및 이론식보다 좀 더 큰 종방향 응력을 산출하므로 안전측으로 유한요소해석 결과를 참조해야 할 것으로 판단된다.
3. 바닥판에 가장 큰 종방향 인장응력을 발생시키는 지배적인 하중조합은 바닥판 온도 저하와 시동하중이 동시에 포함되는 경우로 나타났다.
4. 철도교용 프리캐스트 바닥판의 적정한 프리스트레스의 범위는 2.4 MPa 이상으로 밝혀졌다. 따라서, 국내 도로교용 프리캐스트 바닥판에 통상 도입되고 있는 2.5 MPa이 유사하게 적용될 수 있으므로 도로교용 바닥판의 텐던 제원 및 배치 간격이 큰 변화없이 철도교에도 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. (주)대우건설기술연구소(2005), “프리캐스트 바닥판을 갖는 PSC-BEAM 합성형교의 설계 및 시공법 연구”, DEP-001-2005.
2. 윤석구, 심창수, 정철현, 장승필(1998), “프리캐스트 교량바닥판에 대한 종방향 프리스트레싱력의 산정 방법”, 대한토목학회 논문집, 제18권, 제I-6호, pp.799-810.
3. 정철현, 심창수, 김영진, 장승필(1999), “합성형교량 바닥판의 종방향 거동”, 대한토목학회 논문집, 제19권, 제I-4호, pp.495-504.
4. “LUSAS Ver. 13 - Modeller User Manual”(2005), FEA Ltd.
5. 한국도로교통협회(2005), “도로교설계기준”.
6. 日本道路協會(1990), “道路橋示方書・同解説”.
7. 대한토목학회(2004), “철도설계기준(철도교편)”.
8. American Association of State Highway and Transportation Officials(AASHTO)(1996), “Standard Specification for Highway Bridges”, 16th Ed.

표 2. 종방향 최대 응력

구 분	최대 응력 (MPa)		
	인 장	압 축	
고정하중	0.128	-1.935	
활하중 (충격 포함)	0.235	-1.043	
온도변화	+5℃	0.253	-1.187
	-5℃	1.187	-0.253
장대레일 종하중	0.202	-0.204	
시동하중	2.706	-1.976	
제동하중	0.384	-0.388	
건조수축	0.470	-	
하중조합 1	0.775	-2.286	
하중조합 2	+5℃	1.016	-2.885
	-5℃	1.579	-1.994
하중조합 3	1.827	-3.708	
하중조합 4	+5℃	1.256	-4.293
	-5℃	2.398	-3.122